



**University of  
Zurich**<sup>UZH</sup>

**Zurich Open Repository and  
Archive**

University of Zurich  
University Library  
Strickhofstrasse 39  
CH-8057 Zurich  
[www.zora.uzh.ch](http://www.zora.uzh.ch)

---

Year: 2016

---

## Prozesskaskaden und ihre Modellierung

Frey, Holger ; Huggel, Christian ; Schneider, Demian ; Schaub, Yvonne ; García Hernández, Javier ;  
Portocarreo, César

**Abstract:** Naturgefahren im Hochgebirge lassen sich häufig nicht auf einen einzelnen, isolierten Prozess beschränken, sondern beinhalten viel mehr ganze Ketten von interagierenden Prozessen. Solche Prozesskaskaden stellen eine besondere Herausforderung an die Beurteilung und Modellierung der Gefahrenprozesse und nicht zuletzt auch an deren Kartierung. Am Beispiel eines Ausbruchs eines Gletschersees in den Peruanischen Anden wird in diesem Artikel eine solche Prozesskette erläutert und auf verschiedene Aspekte der Modellierung und Gefahrenkartierung solcher Phänomene eingegangen. Diese Arbeit wurde im Rahmen des von der DEZA finanzierten „Proyecto Glaciares“ durchgeführt und wurde von Schneider et al. (2014) publiziert. En haute montagne, les dangers naturels ne sont souvent pas limités à un processus unique et isolé, mais sont plutôt constitués d'enchaînements de processus qui interagissent. De telles successions de processus représentent un défi particulier pour l'évaluation, la modélisation des dangers et notamment pour leur cartographie. A travers l'exemple d'un débordement d'un lac glaciaire dans les Andes péruviennes, cet article illustre un tel enchaînement de processus et aborde différents aspects de la modélisation et de la cartographie des dangers pour ce type de phénomènes. Ce travail a été réalisé dans le cadre du „Proyecto Glaciares“ financé par la DDC. Il a été publié par Schneider et al. en 2014.

Posted at the Zurich Open Repository and Archive, University of Zurich

ZORA URL: <https://doi.org/10.5167/uzh-128913>

Scientific Publication in Electronic Form

Published Version

Originally published at:

Frey, Holger; Huggel, Christian; Schneider, Demian; Schaub, Yvonne; García Hernández, Javier; Portocarreo, César (2016). Prozesskaskaden und ihre Modellierung. fan-info.ch: FAN Fachleute Naturgefahren Schweiz.

# Prozesskaskaden und ihre Modellierung

Holger Frey (Geographisches Institut, Universität Zürich, holger.frey@geo.uzh.ch)

Christian Huggel (Geographisches Institut, Universität Zürich)

Demian Schneider (Geographisches Institut, Universität Zürich / jetzt: Tiefbauamt Kanton Bern, Oberingenieurkreis IV, Burgdorf)

Yvonne Schaub (Geographisches Institut, Universität Zürich / jetzt: Prorektorat Medizin und Naturwissenschaften, Universität Zürich)

Javier García Hernández (Crealp, Zentrum für alpine Umweltforschung, Sion)

César Portocarrero (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña INAIGEM, Huaraz/Peru)

## Contexte

En haute montagne, les dangers naturels ne sont souvent pas limités à un processus unique et isolé, mais sont plutôt constitués d'enchaînements de processus qui interagissent. De telles successions de processus représentent un défi particulier pour l'évaluation, la modélisation des dangers et notamment pour leur cartographie. A travers l'exemple d'un débordement d'un lac glaciaire dans les Andes péruviennes, cet article illustre un tel enchaînement de processus et aborde différents aspects de la modélisation et de la cartographie des dangers pour ce type de phénomènes. Ce travail a été réalisé dans le cadre du „Proyecto Glaciares“ financé par la DDC. Il a été publié par Schneider et al. en 2014.

## Hintergrund

Naturgefahren im Hochgebirge lassen sich häufig nicht auf einen einzelnen, isolierten Prozess beschränken, sondern beinhalten viel mehr ganze Ketten von interagierenden Prozessen. Solche Prozesskaskaden stellen eine besondere Herausforderung an die Beurteilung und Modellierung der Gefahrenprozesse und nicht zuletzt auch an deren Kartierung. Am Beispiel eines Ausbruchs eines Gletschersees in den Peruanischen Anden wird in diesem Artikel eine solche Prozesskette erläutert und auf verschiedene Aspekte der Modellierung und Gefahrenkartierung solcher Phänomene eingegangen. Diese Arbeit wurde im Rahmen des von der DEZA finanzierten „Proyecto Glaciares“ durchgeführt und wurde von Schneider et al. (2014) publiziert.

## Seeausbruch Laguna 513, 11. April 2010

Am Morgen des 11. April 2010 löste sich in der steilen SW Flanke des Mt. Hualcán in der Cordillera Blanca, Peru, eine Fels-Eislawine von einem geschätzten Volumen von 300'000 bis

400'000 m<sup>3</sup> und stürzte in den See 513 direkt unterhalb des Gletschers (Abb. 1). Aufgrund von Temperaturdaten hochgelegener Meteorstationen in der Region und unter Berücksichtigung der polythermalen Hängegletscher sowie der Gratsituation kann im Anrissgebiet

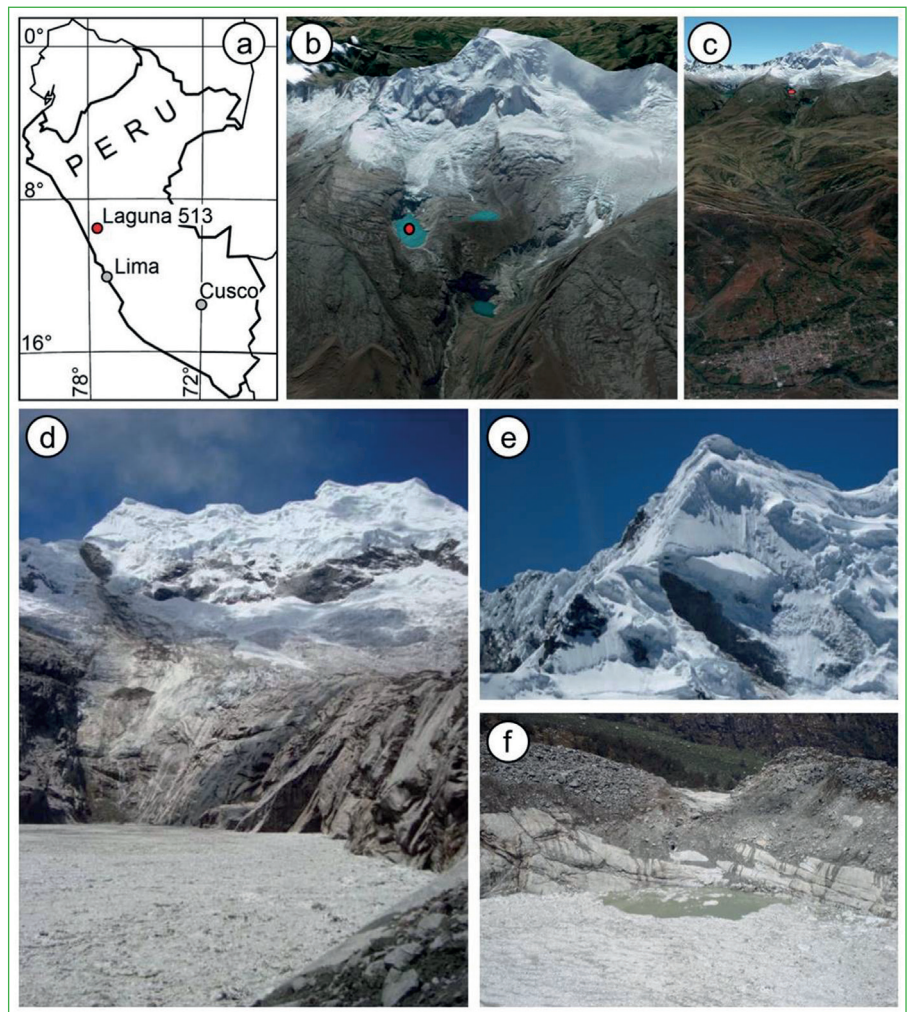


Abbildung 1: Seeausbruch Laguna 513, Peru, am 11. April 2010. (a) Übersichtskarte und Lage; (b) Schrägansicht Laguna 513 (roter Punkt) und Mt. Hualcán (GoogleEarth); (c) Schrägansicht Carhuaz (Vordergrund), Rio Chucchün, Laguna 513 (roter Punkt) (GoogleEarth); (d) Lawinenanriss und -transportspuren und schwimmende Eisblöcke am Tag nach dem Ereignis; (e) Anrisszone; (f) Felsdamm und Wellenspuren, Freibord > 20 m. Fotos d-f von C. Portocarrero, 12. April 2010.

von Untergrundtemperaturen um 0°C, sprich warmen Permafrostbedingungen, ausgegangen werden (Carey et al. 2012). Die durch die Lawine ausgelöste Flutwelle erreichte beim Felsdamm dieses Sees eine Höhe von über 25 - 30 m, überspülte diesen somit um 5-10 m und führte so zu einem Seeausbruch (Carey et al. 2012). Die Flutwelle erodierte auf dem Weg ins Tal viel Lockermaterial und verdoppelte so das Volumen der überschwappenden Welle von ca. 50'000 m<sup>3</sup> auf ein Murgangvolumen von rund 100'000 m<sup>3</sup> (Schneider et al. 2014). Nebst starker Seitenerosion entlang des Laufes des Rio Chucchún führte dieser Ausbruch in der Stadt Carhuaz und einigen kleineren Gemeinden zu diversen Schäden. Es wurden Brücken zerstört, Strassen und Wege beschädigt, Ackerland überflutet und übersart, die Wasser- und Energieversorgung unterbrochen und das Ereignis löste Panik und grosse Unsicherheit in der Bevölkerung aus.

## Modellierung

Die Modellierung von Prozessketten, wie sie beispielsweise bei Ausbrüchen von Gletscherseen als Folge eines Lawinenaufschlags auftreten, stellt diverse Ansprüche an die Modelle, die zur Evaluierung der verschiedenen Prozesse verwendet werden. Einerseits müssen die involvierten Prozesse mit häufig sehr beschränkten Eingabedaten möglichst realistisch physikalisch basiert simuliert werden können; andererseits müssen die numerischen Modelle untereinander kompatibel sein, sprich die Resultate des einen Modells müssen den Anforderungen an die Eingabedaten des Folgemodells genügen.

Für den Fall des Ausbruchs der Laguna 513 wurde die Prozesskette in drei Schritten modelliert (Schneider et al. 2014): (i) die Fels-Eislawine mit RAMMS, (ii) die Wellenbildung und die Überspülung des Dammes mit IBER, und (iii) der eigentliche Seeausbruch mit sei-

nen sich ändernden Charakteristika wiederum mit RAMMS (Abb. 2). RAMMS ist ein physikalisch basiertes, dynamisches Modell, welches die 2D Flachwassergleichungen löst und die Fliesscharakteristika mittels des Voellmy Ansatzes mit einem Parameter für die trockene Coulomb Reibung  $\mu$  und einem turbulenten Reibungsparameter  $\xi$  simuliert. Aufgrund von Volumen, Dichte und Eintrittsgeschwindigkeit der RAMMS-Lawinenmodellierung wurde die Impulswelle im See mittels der Methode von Heller et al. (2008), auf empirischen Zusammenhängen basierend, berechnet. IBER ist ein hydrodynamisches Modell zur Simulation turbulenter instabiler Oberflächenströmungen.

Die mit IBER erarbeiteten Resultate wurden in einen Hydrographen der überschwappenden Welle umgewandelt, welcher wiederum als Startparameter für die folgende Flutmodellierung mit RAMMS diente (Schneider et al. 2014).

Die Ablagerungen im Gelände sowie kurz nach dem Ereignis aufgenommene, hochauflösende Satellitenbilder zeigen verschiedene Erosions- und Ablagerungsmuster, die auf sich ständig ändernde Fliesscharakteristika (Rheologie) des Murgangs schliessen lassen (Abb. 3). Diesem Verhalten wurde Rechnung getragen, indem für die Modellierung des

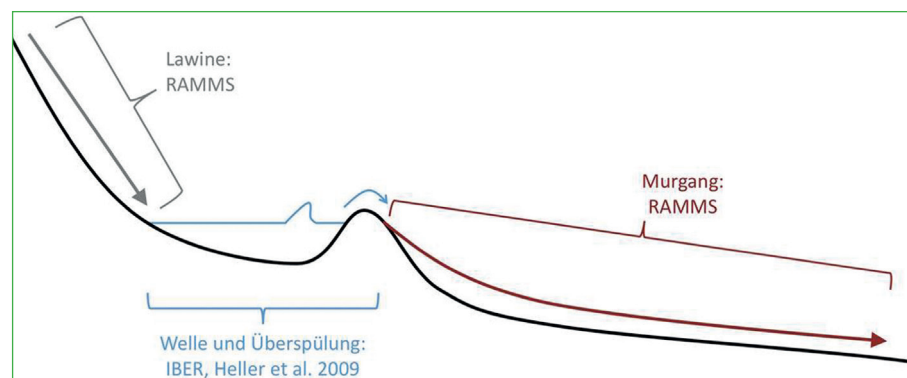


Abbildung 2: Kaskade der involvierten Prozesse und verwendete Modelle zur Modellierung

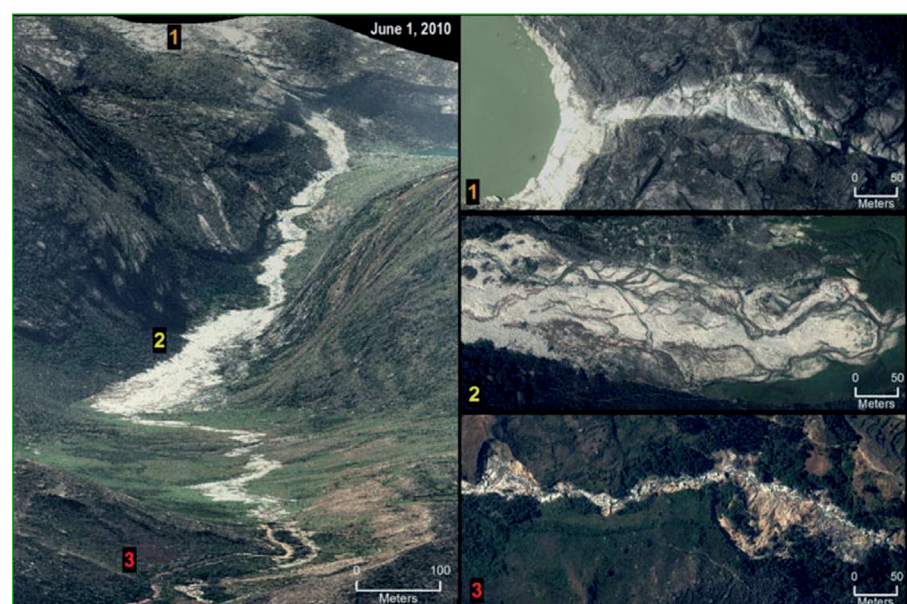


Abbildung 3: Erosions- und Ablagerungsmuster der verschiedenen Fliesscharakteristika. (1) Erosion von Lockermaterial im Bereich des Dammes; (2) Übersarung bei Neigungsabnahme vor Flachstück; (3) Erosions- und Sedimentationsspuren in einem steileren Abschnitt oberhalb der Stadt Carhuaz. Quelle: Carey et al. 2012.



Seeausbruchs mit RAMMS, den beobachteten Spuren entsprechend, fünf verschiedene Fließabschnitte mit unterschiedlichen Reibungsparametern definiert wurden. Diese Parameter wurden aufgrund der geschätzten Korngrößenverteilung und des Wasseranteils bestimmt und anschliessend so kalibriert, dass die Ausdehnung des Murgangs in der Modellierung den beobachteten Erosions- und Ablagerungsspuren entspricht (Schneider et al. 2014). Die RAMMS Resultate der Lawinen- und Murgangmodellierung mit den verschiedenen Fließabschnitten und mit den unterschiedlichen Fließrheologien und ihren entsprechenden Reibungsparametern sind in Abb. 4 dargestellt.

## Gefahrenkartierung

Zwecks einer Gefahrenkartierung für Ausbrüche der Laguna 513 wurden neben dieser Rekonstruktion des Ereignisses vom 11. April 2010 noch zwei weitere, grössere Szenarien mit dem gleichen Vorgehen modelliert (Abb. 4). Als Orientierung dienten die für die Schweiz erarbeiteten Richtlinien zur Gefahrenkartierung von Massenbewegungen mit drei verschiedenen Szenarien unterschiedlicher Dimensionen (klein, mittel, gross). Aufgrund der Seltenheit und oft auch Einmaligkeit von grossen Fels-Eislawinen wurde in diesem Fall allerdings bewusst auf die Angabe von Jährlichkeiten verzichtet. Da sich 1991 bereits ein Ereignis ähnlicher Grösse ereignet

hat, wurde die Fels-Eislawine von 2010 mit einem Volumen von 450'000 m<sup>3</sup> als kleines Szenario festgelegt. Für das mittlere und das grosse Szenario wurden Lawinenvolumina von 1 Mio m<sup>3</sup>, bzw. 3 Mio m<sup>3</sup> angenommen. Diese Werte stützen sich einerseits auf eine Analyse der geomorphologischen Eigenschaften und den beobachteten Veränderungen der vergletscherten SW Flanke des Mt. Hualcán ab (Schaub et al. 2015) und entsprechen andererseits auch vergleichbaren Situationen mit Abgängen grosser Lawinen in anderen Gebirgsregionen. Die RAMMS Resultate für die Lawinen und die Murgangmodellierung der drei Szenarien sind in Abb. 4 wiedergegeben. Tabelle 1 zeigt die Lawinenvolumina,

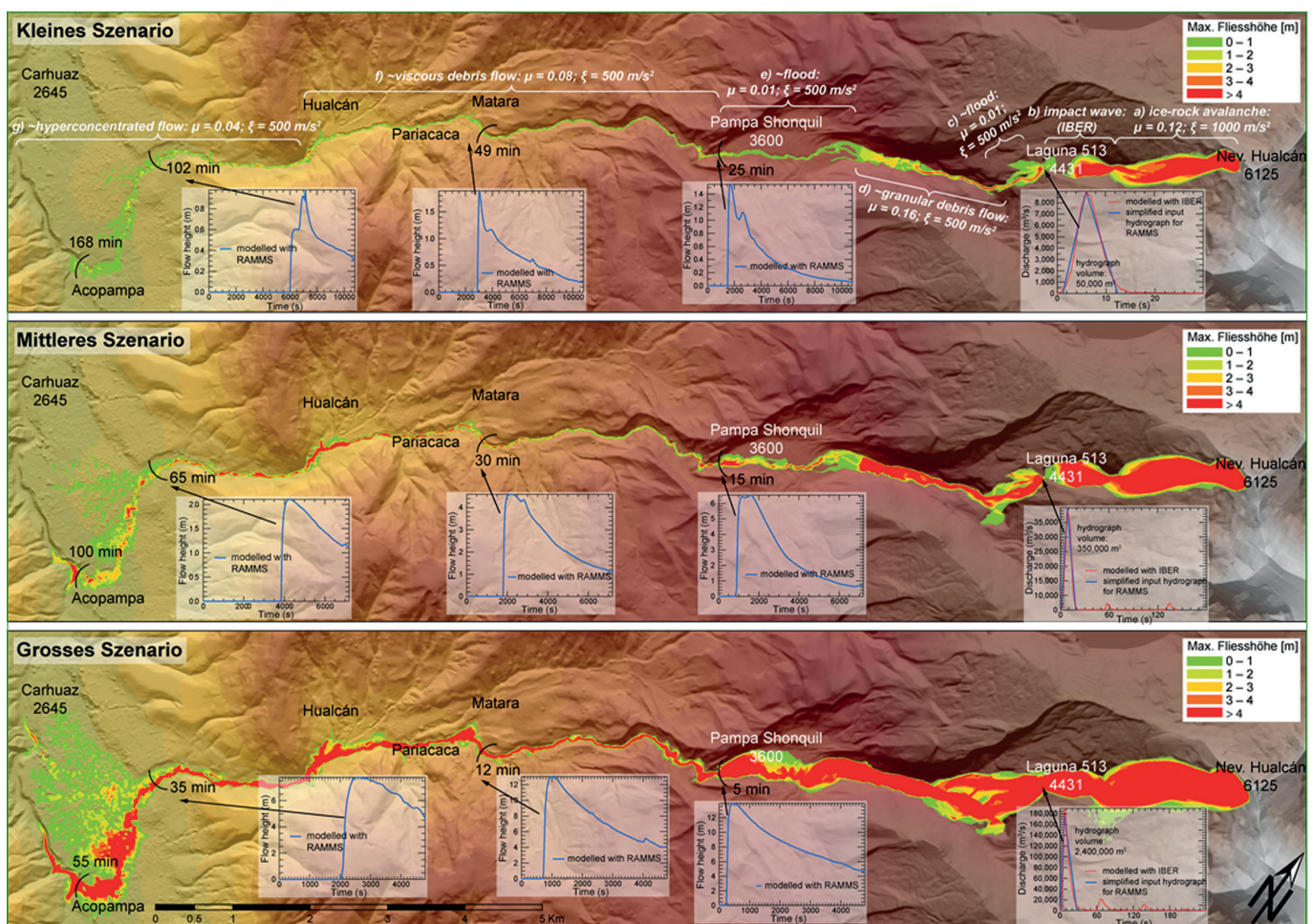


Abbildung 4: RAMMS Ergebnisse der Lawinen- und Murgangs-Fließhöhen der drei Szenarien (s. Tabelle 1). Im obersten Tableau (kleines Szenario) sind die verschiedenen Fließabschnitte mit den unterschiedlichen Reibungsparametern eingetragen, die für alle drei Szenarien verwendet wurden. Die drei Fließhöhen-Hydrographen beziehen sich auf Punkte in der Mitte des Gerinnes. Bei den Abflusshydrographen am Damm sind sowohl die mit IBER berechneten Überschwapphydrographen (rot) wie auch die für die RAMMS Modellierung verwendeten Auslösehydrographen (blau) gezeigt. Abgeändert von Schneider et al., 2014.

Tabelle 1: Charakteristika der Massenbewegungen für die drei Szenarien. Das kleine Szenario entspricht der Rekonstruktion des Seeausbruchs vom April 2010

Szenario	Volumen Fels-Eislawine (Input RAMMS)	Volumen Überschwappwelle (IBER Resultat)	Abflussspitze Überschwappwelle (IBER Resultat)	Murgangvolumen (= 2x Überschwappwelle) (Input RAMMS)
klein	45'000 m <sup>3</sup>	50'000 m <sup>3</sup>	9'000 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	100'000 m <sup>3</sup>
mittel	1'000'000 m <sup>3</sup>	350'000 m <sup>3</sup>	40'000 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	700'000 m <sup>3</sup>
gross	3'000'000 m <sup>3</sup>	2'400'000 m <sup>3</sup>	180'000 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	4'800'000 m <sup>3</sup>

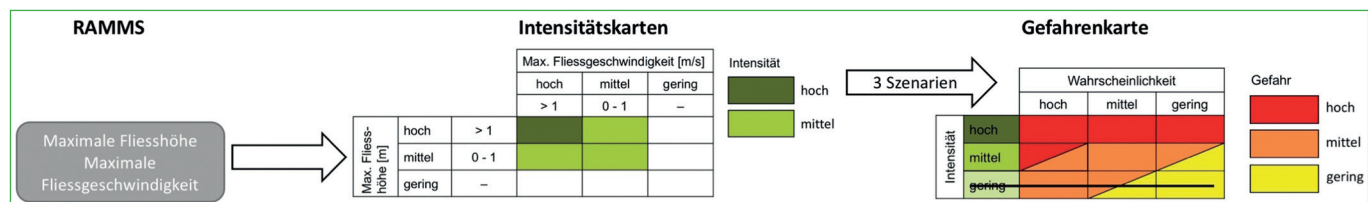


Abbildung 5: Bestimmung der Gefahrenpotentiale aufgrund der RAMMS Ergebnisse, die für jedes der drei Szenarien in eine Intensitätskarte umgewandelt werden. Diese drei Intensitätskarten wiederum werden, entsprechend der Eintretenswahrscheinlichkeit des Szenarios, in Gefahrenniveaus übersetzt.

die Überschwappvolumina und Abflussspitzen beim Damm sowie die Grösse der resultierenden Murgänge. Für Letztere wurden ein Schuttanteil von 50% festgelegt, was wegen der nahezu unbeschränkten Verfügbarkeit von erodierbarem Lockermaterial im Gerinne und aufgrund von Analogien zu vergleichbaren Ereignissen realistisch erscheint.

Maximale Fließhöhen und -geschwindigkeiten gemäss der RAMMS Modellierungen der drei Szenarien wurden verwendet, um die Intensitäten zu bestimmen (Abb. 5). Diese Intensitätskarten wurden dann in Gefahrenstufen übersetzt (Abb. 5). Die generalisierte, vorläufige Gefahrenkarte wurde aufgrund mehrerer Geländebegehungen bereinigt und angepasst, wobei insbesondere kleinräumige Strukturen wie zum Beispiel Brücken und andere Bauwerke berücksichtigt wurden, die im verwendeten digitalen Geländemodell (räumliche Auflösung von 8 m) nicht repräsentiert sind. Zudem wurden neben den drei Gefahrenstufen „gering“, „mittel“, „gross“ noch zwei weitere Gefahrenstufe, „sehr gross“ und „Restgefährdung“, ausgeschieden (Abb. 6),

um eine bessere Konsistenz mit der bestehenden, älteren Gefahrenkarte zu erreichen, aber auch um den peruanischen Richtlinien zu entsprechen und nicht zuletzt auch um die Kommunikation zu vereinfachen. Die Zone mit „sehr grosser“ Gefährdung entspricht dem Gerinne und dem 2010 stark überschwemmten Gebiet. „Restgefährdung“ wurde den Flächen auf dem Schuttfächer zugewiesen, die gemäss RAMMS Modellierungen von den

drei Szenarien nicht betroffen sind, wo eine Überschwemmung aber nicht abschliessend ausgeschlossen werden kann. Ebenso wurden die Farben der verschiedenen Zonen den nationalen Richtlinien angepasst. Schliesslich wurde diese definitive Gefahrenkarte von den zuständigen Behörden und der Gemeinde Carhuaz als neue offizielle Gefahrenkarte für Ausbrüche der Laguna 513 genehmigt und als rechtlich bindendes Dokument anerkannt.

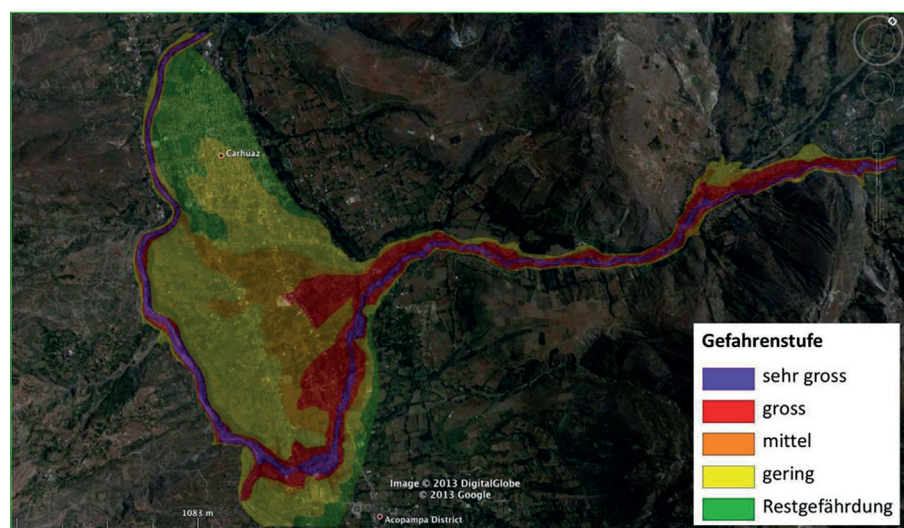


Abbildung 6: Ausschnitt aus der definitiven, im Gelände korrigierten und angepassten Gefahrenkarte für Seeausbrüche. Hintergrundbild GoogleEarth.



## Diskussion und Fazit

Für die individuellen Prozesse, die bei Naturgefahren, insbesondere im Hochgebirge, oft in ganzen Prozessketten zusammenhängen, existiert eine Vielzahl von Modellen unterschiedlicher Komplexitäten und Eigenschaften. Entscheidend für die zuverlässige Modellierung von Prozesskaskaden ist die Verfügbarkeit der benötigten Eingabedaten sowie die Kompatibilität der Modelle untereinander. Im hier gezeigten Beispiel eines Gletscherseeausbruches wurden die physikalisch basierten Modelle RAMMS und IBER verwendet und durch empirische Methoden ergänzt. Mögliche Alternativen für die Modellierung von Gletscherseeausbrüchen mittels Kopplung mehrerer Modelle zeigen zum Beispiel Somos-Valenzuela et al. (2016). Es existieren aber auch Modellansätze, welche alle Komponenten dieser Prozesskaskaden in einem Modell simulieren (z.B. ravaflow, siehe <http://www.avaflow.org>).

Numerische Modelle wie sie hier verwendet wurden, liefern hochaufgelöste, quantitative Resultate, die sich direkt in Intensitäten und schliesslich in Gefahrenstufen übersetzen lassen. Es ist jedoch wichtig festzuhalten, dass solche computerbasierten Modellierungen die detaillierte Arbeit im Gelände nicht ersetzen können, da Ungenauigkeiten der verwendeten digitalen Geländemodelle, Unsicherheiten in der Parameterwahl, modellinhärenten Vereinfachungen und numerische Instabilitäten etc. entscheidende Auswirkungen auf die Modellresultate haben können.

Die grösste Unsicherheitsquelle stellt jedoch oft die Definition der Szenarien dar. Gerade bei seltenen, häufig einmaligen Ereignissen wie Ausbrüche von moränengedämmten Seen, können keine Frequenz-Magnituden Beziehungen zur Wahrscheinlichkeitsbestimmung beigezogen werden, wie sie beispielsweise im Hochwasserschutz aufgrund vergleichs-

weise sehr guter Datengrundlagen verwendet werden. Zudem fehlt infolge der dynamischen Entwicklung und raschen Veränderungen der Umweltbedingungen im Hochgebirge oft eine historische Präzedenz. Für die Kalibrierung und Validierung der Modelle ist es sehr hilfreich, wenn ein dokumentiertes, vergangenes Ereignis beigezogen werden kann, wie das im Fall des Ausbruchs der Laguna 513 der Fall ist, wo die Wellenspur und die Überschwemmungsgebiete zur Kalibrierung von IBER bzw. RAMMS verwendet werden konnten. Fehlt eine solche Referenz, wird die Parameterwahl für die Modelle erschwert und die Unsicherheiten erhöht (vgl. z.B. Somos-Valenzuela et al. 2016). Die Durchführung zahlreicher Modellläufe kann helfen, die Sensitivitäten der Modelle auf einzelne Parameter abzuschätzen, um so auch die zugehörigen Unsicherheiten quantifizieren zu können. Schaub et al. (2015) führten eine solche Analyse am Beispiel der Laguna 513 durch und konnten zeigen, dass die Unsicherheiten der Szenariendefinition die Unsicherheiten der Modellkoppelungen deutlich übertreffen. Hier können solche probabilistischen Modellierungen helfen, die Unsicherheiten der Szenariendefinition zu reduzieren. Allerdings ist in den meisten existierenden Richtlinien für Gefahrenkarten eine bestimmte Anzahl Szenarien mit definierten Eintretenswahrscheinlichkeiten bzw. Jährlichkeiten vorgeschrieben. Am Beispiel der Rekonstruktion des Ausbruchs der Laguna 513 vom April 2010 sowie der Modellierung möglicher Gefahrenszenarien kann das Potential der Kopplung numerischer Modelle zur Simulation von Prozessketten sehr gut demonstriert werden. Es zeigt aber gleichzeitig auch deren Limitierungen auf sowie die Notwendigkeit von Expertenwissen. Einerseits zur Bestimmung von Unsicherheiten und andererseits zur Erstellung einer Gefahrenkarte als wichtiges Endprodukt für die lokalen Behörden und die Bevölkerung.

## Literatur

- Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C. & Haeblerli, W. 2012. An integrated socio-environmental framework for climate change adaptation and glacier hazard management: lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. *Climate Change* 112 : 733–767. DOI: 10.1007/s10584-011-0249-8.
- Heller, V., Hager, W.H. & Minor, H.-E. 2008. Rutscherzeugte Impulswellen in Stauseen, VAW, ETH Zürich.
- Schaub, Y., Huggel, C. & Cochachin, A. 2015. Ice-avalanche scenario elaboration and uncertainty propagation in numerical simulation of rock-/ice-avalanche-induced impact waves at Mount Hualcán and Lake 513, Peru. *Landslides*. DOI: 10.1007/s10346-015-0658-2.
- Schneider, D., Huggel, C., Cochachin, A., Guillén, S. & García, J. 2014. Mapping hazards from glacier lake outburst floods based on modelling of process cascades at Lake 513, Carhuaz, Peru. *Advances in Geosciences* 35 : 145–155. DOI: 10.5194/adgeo-35-145-2014.
- Somos-Valenzuela, M.A., Chisolm, R.E., Rivas, D.S., Portocarrero, C. & McKinney, D.C. 2016. Modeling a glacial lake outburst flood process chain: the case of Lake Palcacocha and Huaraz, Peru. *Hydrology and Earth System Sciences* 20 : 2519–2543. DOI: 10.5194/hess-20-2519-2016.